

博士学位論文審査要旨

氏名	渕野 敬
学位の種類	博士（理学）
学位記番号	博甲第307号
学位授与の日付	2024年3月31日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
学位論文の題目	Rule List Optimization Problem and its Solutions
論文審査委員	主査 神奈川大学 教授 田中 賢 副査 神奈川大学 教授 海谷 治彦 副査 神奈川大学 教授 永松 礼夫 副査 前橋工科大学 教授 三河 賢治

【論文内容の要旨】

本論文は、近年NFVやネットワークセキュリティなどの分野で必須の処理である複雑な条件に従ったパケット分類をとりあげ、分類の高速化に必要な問題の形式化、計算の複雑さ、その解法について理論的、実験的に検討している。

ルールリスト最適化問題は、ルールの入れ替え操作によって最適化を行うルール順序最適化問題と、ルールの再構築によって最適化を行うルールリスト再構築問題に分けられる。前者に対し、本論文ではまず、到着パケットの頻度分布を考慮したルール順序最適化問題を、緩和された条件のもとで新たにRORO(Relaxed Optimal Rule Ordering)として形式化した。条件の緩和により、より高速に分類を行うルール順序を解空間に含む問題としてルールリスト最適化問題を扱うことが可能となった。

ORO(Optimal Rule Ordering)がNP困難であることはすでにHamedらにより示されていたが、OROはパケットの到着頻度分布を考慮しないため現実のパケット分類からは乖離した問題であり、頻度分布を考慮したより現実に即したROROの複雑さについては知られていなかった。本論文では評価パケット数の変動を伴うROROがOROと同様にNP困難であることを示し、ROROの厳密解を求める効率的解法に対する否定的予想を与えた。これによりROROに対する発見的解法や近似解法の必要性が明確となった。

本論文ではまず、ROROに対して提案されてきた二つの解法に対する改善手法を提案した。Tapdiyaらによる $O(n^3)$ の解法であるSub-Graph Merging (SGM)に対し、着目するルールが従属されているルールを考慮した新たな評価法を用いる従属部分グラフを考案し、従来手法に比べほぼすべての場合において遅延が改善できることを計算機実験により示した。日景らによる $O(n^2)$ の解法に対しても、直接従属しているルールの重み平均を用いて並べ替える手法により、より遅延の小さいルールの並びが求められることを示した。

これらに加え、従来用いられた重み平均では十分遅延を減らすことができないようなルールの並びに着目し、遅延の削減を妨げる構造として複数のルールに従属されているルールに対して遅延の

差分を用いて再構成の判定を行う方法を提案した。この他、最適化のための補助手法として重み0のルールの削除法を提案し、上記と組み合わせることで提案手法の有効性を確かなものとした。

一方、論文ではルールリスト再構築問題の NP 困難性も同様に示した。本論文での証明は Allow リストからの帰着によるが、Allow リストの取り扱いの容易さに着目して本論文では新たな再構築アルゴリズムを提案した。従来、予想される計算の複雑さから再構築問題に対する発見的解法は提案されてこなかったが、ここでは論理簡単化法の1つであるコンセンサス法により、数百ルールのリストに対して 80%程度の遅延削減を数秒以内に終える極めて高速かつ有効な手法を構築した。

【論文審査の結果の要旨】

本論文はパケット分類のルールリスト最適化問題について理論および実験の両面から深い検討を行い、従来知られていなかった新たな問題の計算複雑さに対する知見を与えた。一般に #P-complete、NP 困難などのクラスへの帰属はその問題について多項式時間の解法が存在しないことを示唆する結果であり、直ちに発見的解法の必要性を要請する。本論文では、理論的結果を踏まえ様々な発見的解法を考案しその有効性を実験的に検証している。従来もっともよい解を与えるとされてきた Tapdiya らが提案した SGM をはじめ、多くの発見的解法との比較を行い、提案手法が同等以上の解を高速に求められることを実験的に確認し、その有効性を詳細に示している。とりわけ、従来取り扱われてこなかったルールリスト再構築問題に対して数百程度のルールリストに対して 80%程度の遅延削減を数秒程度で達成している。この結果はパケット分類とルールリスト最適化問題に対する今後の新たな方向を示唆しており本論文の顕著な貢献といえる。

ルールリストの最適化において従来ルールリストの等価性判定はとかく見過ごされてきた。このことはその問題が計算量的に手におえないことが明らかであることが背景にあるが、本論文では提案手法の中で SAT ソルバを用いた等価性判定を提案、利用しており、その実用性と有効性を示した。従来見過ごされてきた問題に向き合い、他領域の知見にもとづき解決策を提示した点でこの分野への貢献は大きい。

以上のことより、審査委員会はこの論文の学術的貢献について異論はなく、提出者の博士論文に対し合の審査結果を与えることとする。